

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 5

ФЕВРАЛЬ, 1969

ВЫПУСК 1

КРИВАЯ РОСТА ДЛЯ РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ АТМОСФЕРЫ

М. А. АРАКЕЛЯН

Поступила 10 марта 1968

Рассчитаны кривые роста для расширяющейся атмосферы в модели чистого поглощения. Предполагается, что скорость расширения оболочки постоянна, а интенсивность в непрерывном спектре фотосферы является линейной функцией $\cos \varphi$ (φ — угловое расстояние от центра диска звезды).

Основным методом определения химического состава звезд является метод кривой роста, то есть исследование зависимости эквивалентных ширины линий поглощения от оптической глубины в центре линии, или от числа атомов, участвующих в образовании линии (см., например, [1]). Поскольку химический состав нестационарных звезд представляет несомненный интерес, а подавляющее их большинство обладает протяженными движущимися оболочками, представляет интерес расчет кривой роста для линий поглощения, образованных в движущейся оболочке. Очевидно, что результаты определения химического состава нестационарных звезд путем сравнения кривых роста, полученных из наблюдений, с кривыми, рассчитанными для стационарной атмосферы, будут в принципе отягощены систематическими ошибками. В настоящей статье приведены кривые роста, рассчитанные для модели чистого поглощения, в случае оболочки, расширяющейся с постоянной скоростью. Подобная работа для модели чистого рассеяния при чисто доплеровском коэффициенте поглощения была недавно проделана К. Д. Абханкаром [2]. При этом предполагалось, что оболочка расширяется со скоростью, пропорциональной оптическому расстоянию от фотосферы.

1. *Основные формулы.* Коэффициент поглощения в частоте ν , рассчитанный на один атом, имеющий лучевую скорость v , равен

$$k_\nu = k_0 \frac{a}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-(v/u)^2} d\left(\frac{v}{u}\right)}{\left(\frac{v-v_0}{\Delta\nu_D} + \frac{v}{u}\right)^2 + a^2}, \quad (1)$$

где u — наивероятнейшее значение тепловой скорости атомов данного сорта, $\Delta\nu_D = v_0 u/c$ — доплеровская полуширина линии, $a = \Delta\nu_N/\Delta\nu_D$ — отношение естественной полуширины линии к доплеровской и

$$k_0 = \frac{\pi^{1/2} e^2}{mc} \frac{1}{\Delta\nu_D} f$$

— коэффициент поглощения в центре линии ($\nu = \nu_0$) при $a = 0$.

Пусть непрерывное излучение фотосферы проходит через оболочку, расширяющуюся со скоростью $v(r)$, где r — расстояние от центра звезды. Обозначив через $n(r)$ концентрацию поглощающих атомов, интегрированием по лучу зрения s найдем оптическую толщину оболочки в частоте ν на угловом расстоянии φ от центра диска звезды

$$\tau_\nu(\varphi) = k_0 \frac{a}{\pi} \int_{s_1}^{s_2} n(r) ds \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-y^2} dy}{\left[\frac{v - v_0 \left(1 + \frac{v(r)}{c} \cos \theta\right)}{\Delta\nu_D} + y \right]^2 + a^2}, \quad (2)$$

где $y = v/u$, s_1 и s_2 — значения s на внутренней и внешней границах оболочки (s — расстояние от фотосферы по лучу зрения), θ — угол между лучом зрения и направлением движения данного атома, обусловленного расширением оболочки. Заменив переменную интегрирования и обозначив $(\nu - \nu_0)/\Delta\nu_D$ через x , получим

$$\tau_x(\varphi) = k_0 r_0 \frac{a}{\pi} \sin \varphi \int_{\theta_1}^{\theta_2} n(r) \frac{d\theta}{\sin^2 \theta} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-y^2} dy}{\left(x + y - \frac{v(r)}{u} \cos \theta\right)^2 + a^2}, \quad (3)$$

где θ_1 и θ_2 — значения θ на внутренней и внешней границах оболочки, r_0 — радиус фотосферы звезды.

Предположим далее, что внутренний радиус оболочки равен радиусу фотосферы звезды и оболочка расширяется с постоянной скоростью. Тогда

$$n(r) = n(r_0) \left(\frac{r_0}{r}\right)^2$$

и вместо (3) будем иметь

$$\tau_x(\varphi) = k_0 r_0 \frac{a}{\pi} \frac{n(r_0)}{\sin \varphi} \int_0^\pi d\theta \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-y^2} dy}{\left(x + y - \frac{v}{u} \cos \theta\right)^2 + a^2}. \quad (4)$$

Хотя интегрирование по θ можно выполнить аналитически, мы этого не делали, и вычисление оптической толщины оболочки производилось численно с помощью формулы (4).

Остаточная интенсивность в линии будет равна

$$r_x = \frac{\int_0^{\pi/2} I(\varphi) e^{-\tau_x(\varphi)} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi}{\int_0^{\pi/2} I(\varphi) \cos \varphi \sin \varphi d\varphi}, \quad (5)$$

где $I(\varphi)$ — интенсивность в непрерывном спектре фотосферы. При расчете предполагалось, что интенсивность непрерывного излучения является линейной функцией $\cos \varphi$:

$$I(\varphi) = A + B \cos \varphi. \quad (6)$$

Далее эквивалентная ширина линии поглощения в шкале безразмерных частот ($x = (\nu - \nu_0)/\Delta\nu_D$) вычисляется по формуле

$$W_x = \int_{-\infty}^{\infty} (1 - r_x) dx. \quad (7)$$

Если оптическая толщина в центре линии очень мала, то как всегда имеет место линейная зависимость эквивалентной ширины линии от числа поглощающих атомов. Легко показать, что эта асимптотическая зависимость имеет вид

$$W_x = k_0 N_0 \sqrt{\pi} G, \quad (8)$$

где $N_0 = r_0 n(r_0)$ — число поглощающих атомов на луче зрения, проходящем через центр звезды, и

$$G = \frac{\int_0^{\pi/2} I(\varphi) \varphi \cos \varphi d\varphi}{\int_0^{\pi/2} I(\varphi) \cos \varphi \sin \varphi d\varphi}. \quad (9)$$

В частности, если распределение энергии по диску звезды выражается посредством (6), то G меняется от 1.14 при $B=0$ (равномерное распределение яркости) до 1.10 при $A=0$ (полное потемнение). Таким образом, нуль-пункт кривой роста практически не зависит от коэффициента потемнения яркости непрерывного спектра к краю диска звезды.

2. *Результаты вычислений.* Расчет кривых роста для ряда значений отношения скорости расширения оболочки к тепловой скорости атомов (v/u) и различных коэффициентов, характеризующих уменьшение яркости непрерывного спектра к краю диска звезды, произведен на электронно-вычислительных машинах Ленинградского университета. Результаты вычислений приведены в таблицах 1—6. Данные таблиц 1—3 относятся к случаю $\alpha=10^{-2}$, а таблицы 4—6 соответствуют $\alpha=10^{-1}$. Таблицы 1 и 4 соответствуют случаю равномерного распределения яркости непрерывного спектра ($B=0$); таблицы 2 и 5 — случаю $A=B$ и, наконец, таблицы 3 и 6 — случаю $A=0$ (полное потемнение). Кривые роста для $\alpha=10^{-2}$ и $A=B$ приведены на рис. 1.

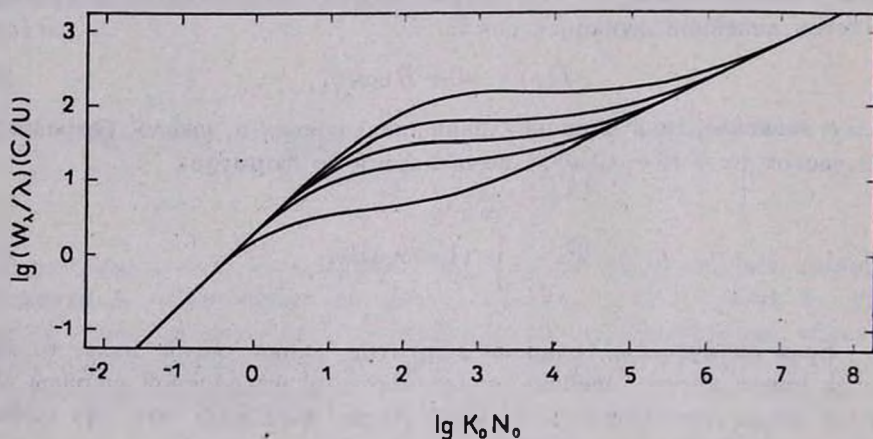


Рис. 1. Кривые роста для случая $\alpha=10^{-2}$, $A=B$, $v/u=0$ (нижняя кривая), 50, 100, 200, 500.

Анализ таблиц и рис. 1 показывают, что влияние расширения оболочки проявляется в увеличении эквивалентных ширин слабых линий. С ростом скорости расширения возрастает протяженность области, в которой эквивалентная ширина линии пропорциональна числу поглощающих атомов, то есть кривая роста приближается к асимптоте, соответствующей слабым линиям. Такое поведение кривой роста отметили ранее И. Кубиковски и Т. Сюрла [3].

Таблица 1

v/u	0	50	100	200	500
$\lg k_0 N_0$	$\lg(W\lambda/\lambda) (c/u)$				
-2.0	-1.70	-1.69			
-1.5	-1.20	-1.20	-1.19		
-1.0	-0.71	-0.70	-0.69	-0.69	
-0.5	-0.25	-0.20	-0.19	-0.19	-0.19
0.0	0.15	0.27	0.28	0.30	0.31
0.5	0.41	0.69	0.74	0.77	0.79
1.0	0.54	1.02	1.12	1.18	1.25
1.5	0.62	1.21	1.39	1.52	1.66
2.0	0.68	1.27	1.53	1.75	1.98
2.5	0.77	1.30	1.56	1.83	2.17
3.0	0.92	1.33	1.57	1.84	2.22
3.5	1.11	1.39	1.60	1.85	2.23
4.0	1.35	1.50	1.66	1.88	2.24
4.5	1.60	1.66	1.76	1.94	2.26
5.0	1.85	1.87	1.92	2.04	2.29
5.5	2.10	2.11	2.13	2.18	2.36
6.0	2.35	2.36	2.36	2.37	2.48
6.5		2.60	2.60	2.60	2.65
7.0			2.85	2.85	2.86
7.5				3.10	3.10
8.0					3.35

Таблица 2

v/u	0	50	100	200	500
$\lg k_0 N_0$	$\lg(W\lambda/\lambda) (c/u)$				
-2.0	-1.70	-1.70			
-1.5	-1.21	-1.20	-1.20		
-1.0	-0.72	-0.71	-0.70	-0.70	
-0.5	-0.26	-0.21	-0.20	-0.20	-0.20
0.0	0.14	0.26	0.27	0.29	0.30
0.5	0.41	0.68	0.73	0.76	0.78
1.0	0.54	1.00	1.10	1.17	1.24
1.5	0.62	1.18	1.36	1.49	1.64
2.0	0.68	1.23	1.49	1.72	1.94
2.5	0.77	1.26	1.52	1.79	2.13
3.0	0.92	1.30	1.53	1.80	2.18
3.5	1.11	1.36	1.57	1.81	2.19
4.0	1.35	1.48	1.63	1.84	2.20
4.5	1.60	1.65	1.74	1.91	2.22
5.0	1.85	1.87	1.91	2.02	2.26
5.5	2.10	2.11	2.12	2.17	2.33
6.0	2.35	2.35	2.36	2.37	2.46
6.5		2.60	2.60	2.60	2.64
7.0			2.85	2.85	2.85
7.5				3.10	3.10
8.0					3.35

Таблица 3

v/u	0	50	100	200	500
$\lg k_0 N_0$	$\lg(W\lambda/\lambda) (c/u)$				
-2.0	-1.71	-1.71			
-1.5	-1.22	-1.21	-1.21		
-1.0	-0.73	-0.72	-0.71	-0.71	
-0.5	-0.27	-0.22	-0.21	-0.21	-0.21
0.0	0.14	0.24	0.26	0.28	0.29
0.5	0.40	0.66	0.72	0.75	0.77
1.0	0.54	0.96	1.07	1.14	1.23
1.5	0.62	1.12	1.31	1.45	1.61
2.0	0.68	1.17	1.42	1.66	1.89
2.5	0.76	1.20	1.45	1.72	2.05
3.0	0.92	1.24	1.47	1.73	2.10
3.5	1.11	1.32	1.51	1.74	2.12
4.0	1.35	1.45	1.58	1.78	2.13
4.5	1.60	1.64	1.71	1.85	2.15
5.0	1.85	1.86	1.89	1.98	2.20
5.5	2.10	2.10	2.11	2.14	2.29
6.0	2.35	2.35	2.35	2.36	2.43
6.5		2.60	2.60	2.60	2.62
7.0			2.85	2.85	2.85
7.5				3.10	3.10
8.0					3.35

Таблица 4

v/u	0	50	100	200	500
$\lg k_0 N_0$	$\lg(W\lambda/\lambda) (c/u)$				
-2.0	-1.70	-1.69			
-1.5	-1.20	-1.19	-1.19		
-1.0	-0.71	-0.70	-0.69	-0.69	
-0.5	-0.25	-0.20	-0.19	-0.19	-0.19
0.0	0.16	0.27	0.28	0.30	0.31
0.5	0.44	0.69	0.74	0.77	0.79
1.0	0.60	1.03	1.12	1.18	1.25
1.5	0.73	1.22	1.40	1.52	1.66
2.0	0.95	1.31	1.54	1.75	1.98
2.5	1.12	1.38	1.59	1.84	2.17
3.0	1.35	1.50	1.66	1.87	2.23
3.5	1.60	1.66	1.76	1.94	2.26
4.0	1.85	1.87	1.92	2.03	2.30
4.5	2.10	2.11	2.13	2.18	2.37
5.0	2.35	2.36	2.36	2.37	2.49
5.5	2.60	2.60	2.60	2.60	2.66
6.0		2.85	2.85	2.85	2.87
6.5			3.10	3.10	3.11
7.0				3.35	3.35
7.5					3.60

Таблица 5

Таблица 6

v/u	0	50	100	200	500
$\lg k_0 N_0$	$\lg(W\lambda/\lambda) (c/u)$				
-2.0	-1.70	-1.70			
-1.5	-1.21	-1.20	-1.20		
-1.0	-0.72	-0.71	-0.70	-0.70	
-0.5	-0.26	-0.21	-0.20	-0.20	-0.20
0.0	0.15	0.26	0.27	0.29	0.30
0.5	0.44	0.68	0.73	0.76	0.78
1.0	0.59	1.01	1.10	1.17	1.24
1.5	0.73	1.19	1.37	1.49	1.64
2.0	0.94	1.27	1.51	1.72	1.94
2.5	1.11	1.36	1.56	1.80	2.13
3.0	1.35	1.48	1.63	1.84	2.19
3.5	1.60	1.65	1.74	1.91	2.22
4.0	1.85	1.87	1.91	2.01	2.27
4.5	2.10	2.11	2.12	2.17	2.34
5.0	2.35	2.35	2.36	2.37	2.47
5.5	2.60	2.60	2.60	2.60	2.65
6.0		2.85	2.85	2.85	2.87
6.5			3.10	3.10	3.10
7.0				3.25	3.25
7.5					3.60

v/u	0	50	100	200	500
$\lg k_0 N_0$	$\lg(W\lambda/\lambda) (c/u)$				
-2.0	-1.71	-1.71			
-1.5	-1.22	-1.21	-1.21		
-1.0	-0.73	-0.72	-0.71	-0.71	
-0.5	-0.27	-0.22	-0.21	-0.21	-0.21
0.0	0.15	0.24	0.26	0.28	0.29
0.5	0.43	0.66	0.72	0.75	0.77
1.0	0.59	0.97	1.07	1.14	1.21
1.5	0.73	1.14	1.32	1.45	1.61
2.0	0.94	1.22	1.45	1.66	1.89
2.5	1.11	1.31	1.50	1.74	2.06
3.0	1.35	1.45	1.58	1.78	2.12
3.5	1.60	1.64	1.71	1.85	2.15
4.0	1.85	1.86	1.89	1.97	2.21
4.5	2.10	2.10	2.11	2.14	2.29
5.0	2.35	2.35	2.35	2.36	2.44
5.5	2.60	2.60	2.60	2.60	2.63
6.0		2.85	2.85	2.85	2.85
6.5			3.10	3.10	3.10
7.0				3.35	3.35
7.5					3.60

Что касается потемнения диска звезды к краю, то, как и следовало ожидать, его влияние проявляется в уменьшении эквивалентных ширины линий поглощения, причем этот эффект также возрастает с увеличением скорости расширения оболочки. При фиксированном значении отношения скорости расширения оболочки к тепловой скорости атомов различие в эквивалентных ширинах линий поглощения за счет этого эффекта достигает наибольшего значения в промежуточной („горизонтальной“) части кривой роста.

Из приведенных результатов следует, что применение к определению химического состава нестационарных звезд теоретической кривой роста, рассчитанной для неподвижной атмосферы, будет приводить к недооценке числа тех атомов, содержание которых определяется по линиям поглощения, соответствующим „горизонтальной“ части кривой роста. Допускаемая при этом ошибка будет тем больше, чем меньше тепловая скорость атомов данного сорта. Поэтому для определения содержания атомов данного сорта в принципе необходимо использовать теоретическую кривую роста, рассчитанную для соответствующих атомам данного сорта тепловых скоростей. (Предполагается, что скорость расширения оболочки известна).

Не исключена, однако, и возможность того, что эквивалентные ширины линий поглощения в спектрах нестационарных звезд обусловлены в первую очередь отношением скорости расширения оболочки

и скорости турбулентных движений. Последние не зависят от атомных весов, и для определения содержания всех элементов следует использовать одну и ту же кривую роста, рассчитанную для имеющегося отношения скорости расширения оболочки и скорости турбулентного движения.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория

THE CURVE OF GROWTH FOR AN EXPANDING ATMOSPHERE

M. A. ARAKELIAN

The curves of growth for an expanding atmosphere in the case of pure absorption are calculated. The velocity of expansion is supposed to be constant and the intensity of the continuous radiation is supposed to be a linear function of $\cos \varphi$ (φ is the angular distance from the center of the limb of the star).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л. Х. Аллер, сб. „Звездные атмосферы“, под ред. Дж. Л. Гринстейна, ИЛ., М., 1963, стр. 165.
2. K. D. Abhyankar, Ap. J., 140, 1353, 1964; 141, 1056, 1965.
3. J. Kubikowski, T. Ciurla, Acta astr., 15, 177, 1965.